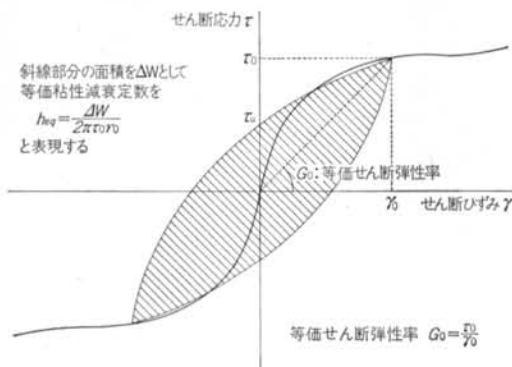


# 高減衰積層ゴムの復元力モデルの開発

菊地 優  
(大崎研究室)  
前林 和彦  
(大崎研究室)  
田村 和夫  
(大崎研究室)

## § 1. はじめに

近年、免震構法を採用した構造物が多く見られるようになり、また多種多様な免震システムが提案されている。以前は、天然ゴムを用いた積層ゴムと、鋼材ダンパーあるいはオイルダンパー等の減衰機構とを組み合わせたシステム、いわゆる支承と減衰機構とが分離されたシステムが多く見られたが、最近では支承としての積層ゴムに減衰機能が付加された高減衰積層ゴムや鉛入り積層ゴムが主流となりつつある。免震建物の設計では一般的に時刻歴応答解析による応答予測が行なわれている<sup>1)2)</sup>が、精度の良い応答予測を行なうためには、免震装置の復元力特性の適切なモデル化が不可欠である。既往の研究によれば、高減衰積層ゴムや鉛入り積層ゴムの減衰特性は振動数依存性をほとんど有しないことから、免震建物の時刻歴応答解析においては、多くの場合履歴減衰として扱われている。履歴減衰として扱う既往の復元力モデルについてみると Bi-Linear モデル、Tri-Linear モデルなどの一般的な非線形復元力モデルをそのまま適用する方法に加えて、最近では免震装置特有の複雑な復元力特性をより忠実に再現する目的で、ひずみ依存性を考慮して復元力モデルのパラメータを刻々と更新する方法<sup>3)</sup>、複数の復元力モデルを組み合わせる方法<sup>4)</sup>等が提案されて



図一 高減衰ゴム物性値の定義

いる。これらの復元力モデルのパラメータは実験結果より得られた荷重-変形関係から設定されるが、その設定方法は一義的ではないために適切なパラメータの設定が困難であるのが現状である。本研究では、免震装置として高減衰積層ゴムに着目し、既に得られている復元力特性の種々の指標を用いて実挙動を適切に表現できる復元力モデルを設定し、種々の実験結果との比較によりその妥当性を検討するものである。

## § 2. 高減衰ゴムの材料特性

高減衰積層ゴムの復元力特性を定量的に評価するために、ここで論じる復元力モデルはすべて、高減衰ゴムの要素試験の結果、既に得られている等価せん断弾性率  $G_0$  (等価剛性)、等価粘性減衰定数  $h_{eq}$ 、Y軸切片応力  $\tau_a$  の実験データ (図一参照) を基にしている。いずれも、以下に示すようなせん断ひずみ  $\gamma$  をパラメータとした実験式の形で表現されている。ここでは、文献5)の高減衰ゴム (低弾性タイプ) の実験式について以下に示す。

(1) 等価せん断弾性率  $G_0$  (kgf/cm<sup>2</sup>)

$$\left. \begin{aligned} 0.1 \leq \gamma \leq 0.5 : G_0 &= 18.6 - 56.9\gamma + 95.0\gamma^2 - 58.4\gamma^3 \\ 0.5 \leq \gamma \leq 1.6 : G_0 &= 10.7 - 10.6\gamma + 4.99\gamma^2 - 0.76\gamma^3 \\ 1.6 \leq \gamma \leq 3.0 : G_0 &= 4.33 + 0.14\gamma - 0.75\gamma^2 + 0.21\gamma^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

(2) 等価粘性減衰定数  $h_{eq}$

$$\left. \begin{aligned} 0.1 \leq \gamma \leq 1.0 : h_{eq} &= 0.19 - 0.16\gamma + 0.18\gamma^2 - 0.07\gamma^3 \\ 1.0 \leq \gamma \leq 3.0 : h_{eq} &= 0.16 - 0.014\gamma \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

(3) Y軸切片応力  $\tau_a$  (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\tau_a = \alpha\tau_0$  として  $\alpha$  が下式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} 0.1 \leq \gamma \leq 1.1 : \alpha &= 0.35 - 0.22\gamma + 0.18\gamma^2 - 0.05\gamma^3 \\ 1.1 \leq \gamma \leq 3.0 : \alpha &= 0.28 - 0.02\gamma \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

ただし、 $\tau_0$  は過去に経験した最大せん断応力 (図一参

照)を示す。

### § 3. 復元力モデル

本研究で提案する復元力モデルは、既に提案されている修正 Bi-Linear モデル、修正 Ramberg-Osgood モデルと同様のパラメータの設定条件に従うものとした。既往の復元力モデルを含め、以下にパラメータの設定条件、および各復元力モデルのパラメータの設定方法について示す。

条件 1：骨格曲線は、変位を  $U$ 、復元力を  $F$  として、式(1)で表現される等価せん断弾性率  $G_0$  を用いて、式(4)で与えられる。

$$F = \frac{A_r G_0}{H_r} U \quad \dots\dots(4)$$

ただし、 $A_r$  はゴムの断面積、 $H_r$  はゴムの総厚を表わす。

条件 2：骨格曲線上からの除荷時の履歴曲線から求まる等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  が、式(2)で表現される値と等しくなる。

条件 3：骨格曲線上からの除荷時の履歴曲線は、式(3)で表現される Y 軸切片応力  $\tau_u$  を通る。

#### 3.1 修正 Bi-Linear モデル

修正 Bi-Linear モデルでは条件 1～条件 3 を満たすように初期剛性  $G_1$ 、降伏後剛性  $G_2$ 、降伏時耐力  $F_y$  を設定する(図-2 参照)。この場合、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $F_y$  は式(5)～(7)のように表現される<sup>9)</sup>。

$$G_1 = \frac{\alpha - 0.5\pi h_{eq} + 0.5\pi\alpha h_{eq}}{\alpha - 0.5\pi h_{eq}} G_0 \quad \dots\dots(5)$$

$$G_2 = (1 - \alpha) G_0 \quad \dots\dots(6)$$

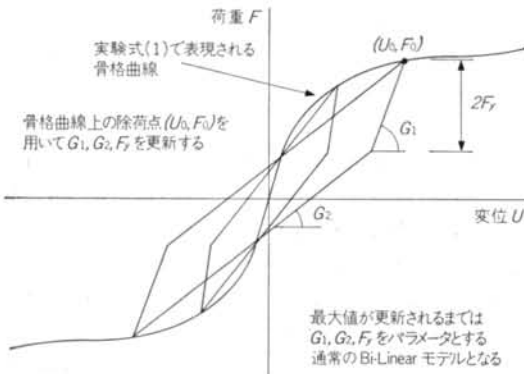


図-2 修正 Bi-Linear モデルの履歴ルール

$$F_y = \frac{F_u G_1}{(G_1 - G_2)} \quad \dots\dots(7)$$

ただし、 $F_u = \alpha F_0$  とする ( $F_0$  は過去に経験したせん断力の最大値とする)。

ひずみ依存性を考慮するために、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $F_y$  は変位の最大値が更新されるたびに再計算を行なう。

#### 3.2 修正 Ramberg-Osgood モデル

Ramberg-Osgood モデルの履歴曲線を式(8)で表現する。

$$\beta \frac{U - U_0}{2} = \frac{F - F_0}{2} \left( 1 + \alpha \left| \frac{F - F_0}{2} \right|^{n-1} \right) \quad \dots\dots(8)$$

式(8)の性質から、Ramberg-Osgood モデルでは修正 Bi-Linear モデルのように条件 1～条件 3 をすべて満たすことはできない。藤田らの方法<sup>9)</sup>では、等価粘性減衰定数が実験値に最も近い値となるようにして式(8)中のパラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $n$  を決定しているが、簡略化のためにここでは  $n$  を固定して、条件 1 と条件 2 を満足するようなパラメータを式(9)、(10)から求める<sup>7,8)</sup>。なお、予備解析において  $n=2\sim 3$  の範囲では、式(9)、(10)によって得られるパラメータを用いた履歴曲線上の Y 軸切片応力は、実験式(3)をほぼ満足することを確認している。

$$\alpha = F_m^{1-n} \left( \frac{n-1}{n-1-0.5\pi(n+1)h_{eq}} - 1 \right) \quad \dots\dots(9)$$

$$\beta = \frac{n-1}{n-1-0.5\pi(n+1)h_{eq}} G_0 \quad \dots\dots(10)$$

ひずみ依存性を考慮するために修正 Bi-Linear モデルと同様、最大変位が更新されるたびに式(9)、(10)を用いて  $\alpha$ 、 $\beta$  を再計算する(図-3 参照)。

#### 3.3 修正 Masing 則モデル

Masing 則とは、下式で表現される復元力モデル(図-4 参照)である<sup>9)</sup>。

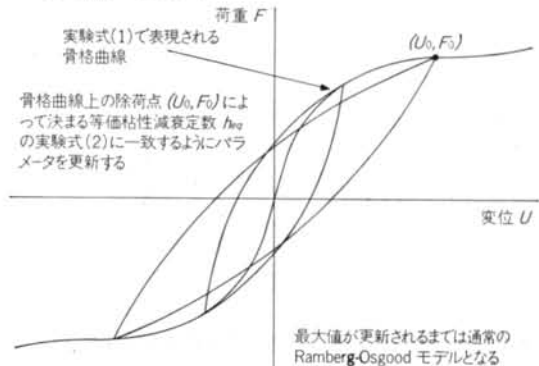


図-3 修正 Ramberg-Osgood モデルの履歴ルール

骨格曲線:  $F=f(U)$  .....(1)

履歴曲線:  $\frac{F-F_0}{m} = f\left(\frac{U-U_0}{m}\right)$  .....(2)

ただし、 $(U_0, F_0)$  は除荷点、 $m$  は履歴曲線の骨格曲線に対する相似比を表す。

既に提案されている復元力モデルについて考えると、骨格曲線のみ式(4)を用い、履歴曲線に1次式を用いたものが修正 Bi-Linear モデルであり、指数関数を用いた

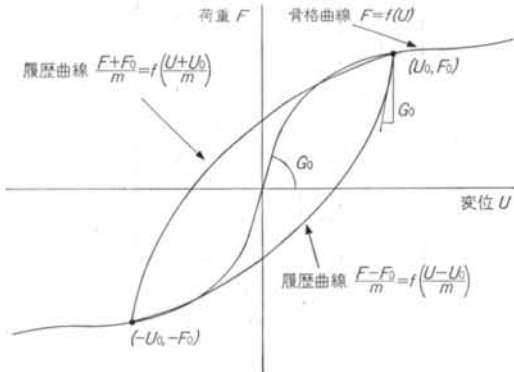


図-4 Masing 則の概念

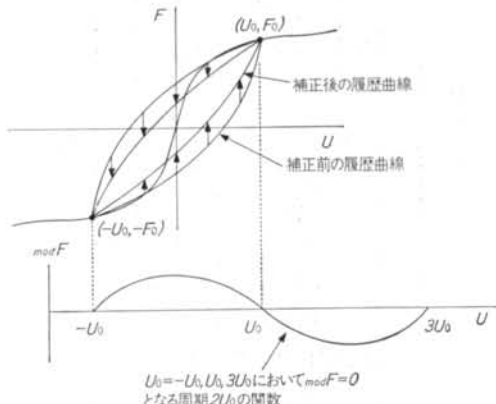


図-5 等価粘性減衰定数の補正

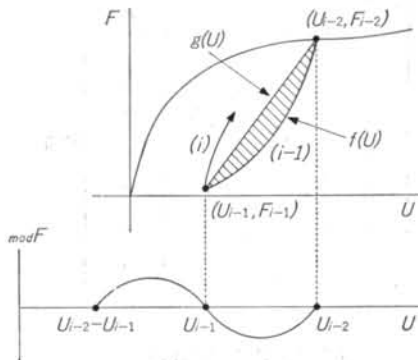


図-6 ランダムな振動状態に対する履歴曲線

ものが修正 Ramberg-Osgood モデルと解釈できる。ここでは、骨格曲線に用いた式(4)を履歴曲線にも適用し、ハードニング領域まで追従可能なモデルについて考える。

また、既往の復元力モデルと同様に式(2)の相似比を  $m=2$  として、一定変位振幅に対しては閉じたループとなるようにする。この場合は、式(1)で表現される曲線を変位、荷重方向にそれぞれ2倍に拡大して、原点を骨格曲線上の除荷点  $(U_0, F_0)$  に移動したものが式(2)となる。ただし、Masing 則をそのまま適用するとすべての履歴ルールが決定されてしまい、等価粘性減衰定数を等価にするという条件2は保証されない。そこで、この条件を満足させるために補正項  $\text{mod } F$  を考慮して式(2)を次式のように書き換える。

$$F = 2f\left(\frac{U-U_0}{2}\right) + F_0 + \text{mod } F \quad \dots\dots(3)$$

除荷点  $(U_0, F_0)$  からの履歴曲線は Masing 則によると  $(U_0, F_0)$  を原点をとする奇関数となる。したがって補正項も同様に  $(U_0, F_0)$  を原点とする奇関数とすれば、以後の数学的表現が簡単となる。かつ、Masing 則を満足させるため  $U = -U_0, U_0, 3U_0$  において補正項  $\text{mod } F$  が0とならなければならない(図-5参照)。このような性質を持つ関数として sine 関数を考える。この場合、補正項は式(4)で表現される。

$$\text{mod } F = A \sin\left(\frac{U-U_0}{2U_0} \pi\right) \quad \dots\dots(4)$$

図-5 は、 $(U_0, F_0) \sim (-U_0, -F_0)$  間の定常ループに対する補正を示したが、ランダムな振動状態を考慮するために、図-6 のように一般化して考える。 $i$  番目の履歴曲線は  $\left(\frac{U_{i-2}+U_{i-1}}{2}, \frac{F_{i-2}+F_{i-1}}{2}\right)$  を原点とし、振幅を  $\left|\frac{U_{i-2}-U_{i-1}}{2}\right|$  とした定常ループの等価粘性減衰定数が、同振幅における実験値と等価であると仮定して補正項を求める。この場合、 $i$  番目の補正項  $\text{mod } F_i$  は式(4)と同様にして式(5)のように表現される。

$$\text{mod } F_i = \sum_{j=1}^i A_j \sin\left(\frac{U-U_{j-1}}{|U_{j-2}-U_{j-1}|} \pi\right) \quad \dots\dots(5)$$

係数  $A_i$  は、 $A_1, A_2 \sim A_{i-1}$  が求まっているものとして次のように求める。 $(i-2) \sim (i-1)$  間を定常ループと見なして履歴モデルの等価粘性減衰定数  $c_{nl} h_{eq}$  を求める。

図-6 の斜線部分の面積を  $c_{nl} W$  とすると

$$c_{nl} W = \left| \int_{U_{i-2}}^{U_{i-1}} \{g(U) - f(U)\} dU \right| \quad \dots\dots(6)$$

となる。ここで、 $g(U)$  は  $(U_{i-2}, F_{i-2}) \sim (U_{i-1}, F_{i-1})$  を結ぶ直線、 $f(U)$  は  $(i-1)$  番目の履歴曲線を表わし、それぞれ下式のように表現される。

$$g(U) = \frac{F_{i-1} - F_{i-2}}{U_{i-1} - U_{i-2}}(U - U_{i-2}) + F_{i-2} \quad \dots\dots(17)$$

$$f(U) = F_{i-2} + 2f\left(\frac{U - U_{i-2}}{2}\right) + \text{mod}F_{i-1} \quad \dots\dots(18)$$

式(17), (18)を式(16)に代入して整理すると, 式(19)のように表現される.

$$\begin{aligned} \text{ca1}W &= \frac{(F_{i-1} - F_{i-2})(U_{i-1} - U_{i-2})}{2} \\ &- 2 \int_{U_{i-2}}^{U_{i-1}} f\left(\frac{U - U_{i-2}}{2}\right) dU + \sum_{j=1}^{i-1} A_j \frac{|U_{j-1} - U_j|}{\pi} \\ &\cdot \left\{ \cos\left(\frac{U_{i-1} - U_{i-2}}{|U_{j-1} - U_j|} \pi\right) - 1 \right\} \quad \dots\dots(19) \end{aligned}$$

式(19)によって得られた ca1W によって ca1heq は式(20)のようになる.

$$\text{ca1}heq = \frac{4 \text{ca1}W}{\pi |F_{i-2} - F_{i-1}| |U_{i-2} - U_{i-1}|} \quad \dots\dots(20)$$

実験式から得られる expheq と対応する図-6の斜線部分の面積 expW との関係は, 式(20)と同様にして

$$\text{exp}heq = \frac{4 \text{exp}W}{\pi |F_{i-2} - F_{i-1}| |U_{i-2} - U_{i-1}|} \quad \dots\dots(21)$$

と表現される.  $i$  番目の履歴曲線で新たに付加される修正項 modfi は

$$\text{mod}fi = A_i \sin\left(\frac{U - U_{i-2}}{|U_{i-2} - U_{i-1}|} \pi\right) \quad \dots\dots(22)$$

であり, これによる付加面積は式(23)のようになる.

$$\Delta W = \int_{U_{i-2}}^{U_{i-1}} \text{mod}fi dU = \frac{2 A_i |U_{i-2} - U_{i-1}|}{\pi} \quad \dots\dots(23)$$

一方,  $(U_{i-2}, F_{i-2}) \sim (U_{i-1}, F_{i-1})$  間を定常ループと見なした解析モデルのループ面積が実験値と等価になるためには, 24式を満たさなければならない.

$$\text{exp}W = \text{ca1}W + \Delta W \quad \dots\dots(24)$$

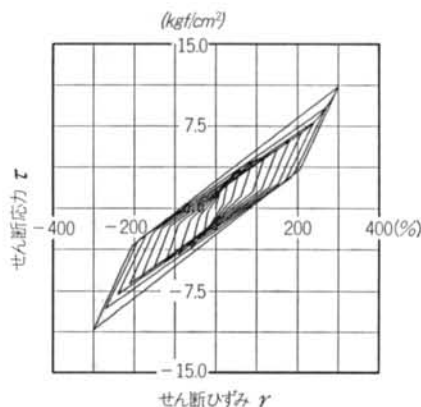
式(24)に式(19), (20), (23)を代入して  $A_i$  について解くと

$$A_i = \frac{\pi^2}{8} |F_{i-2} - F_{i-1}| (\text{exp}heq - \text{ca1}heq) \quad \dots\dots(25)$$

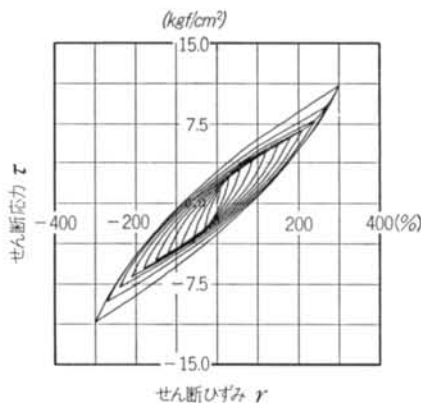
となり,  $i$  番目の履歴曲線が決定される.

厳密に言えば, 本研究で論じる復元力モデルはすべて Masing 則を適用したモデルといえるが, 以下では履歴曲線にも式(4)を適用し, 等価粘性減衰定数を等しくするために修正項を加えた復元力モデルを, 修正 Masing 則モデルと称することにする. 修正 Bi-Linear モデルおよび修正 Ramberg-Osgood モデルを用いて実験式(1)~(3)の適用限界であるせん断ひずみ300%までの  $\tau$ - $\gamma$  関係を図-7(a), (b)に示す. 両モデルとも, 骨格曲線がソフトニングからハードニングに移行するせん断ひずみ150%

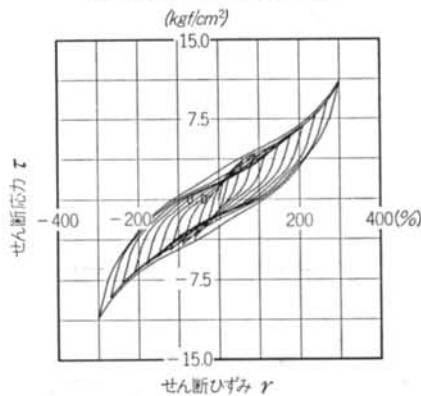
以上の領域では, 履歴曲線が同ひずみレベルにおける骨格曲線上の値を大きく上回る傾向が見られ, 履歴曲線から骨格曲線への移行に対して不連続性が強く不自然となる. これは, 両モデルとも履歴曲線に用いた関数が常にソフトニング性を有するためであり, 履歴曲線がソフト



(a) 修正 Bi-Linear モデル



(b) 修正 Ramberg-Osgood モデル



(c) 修正 Masing 則モデル

図-7 各復元力モデルによる  $\tau$ - $\gamma$  関係

ニングからハードニングに移行する性質を有すれば、骨格曲線上の除荷点に対して履歴曲線は滑らかに漸近する。図-7(c)には、修正 Masing 則モデルを用いたせん断ひずみ 300% までの高減衰ゴムの  $\tau$ - $\gamma$  関係を示す。履歴曲線にも式(4)を適用したことにより、修正 Masing 則モデルでは、修正 Bi-Linear モデル、修正 Ramberg-Osgood 則モデルによる  $\tau$ - $\gamma$  関係と比較して、せん断ひずみ 150% 以上の領域における履歴曲線の性状が改善されていることが分かる。

## § 4. 実験結果の解析

復元力モデルの妥当性を検討するため、高減衰積層ゴムの実験結果と解析結果との比較を行なう。実験に用いた高減衰積層ゴムは、免震床システムにおいて免震装置として使用される、図-8 に示すような多段積層ゴムである。ここでは、正負交番繰り返し漸増载荷による静的载荷実験と振動台による動的振動実験の 2 種類について検討する<sup>10)</sup>。

高減衰多段積層ゴムのモデル化に関しては、各層 4 個  $\times$  6 層の計 24 個の要素積層ゴムをゴム部の総厚 16.2cm、ゴム部の総面積 84.9cm<sup>2</sup> の 1 個の積層ゴムに置換した。いずれのモデルも、式(1)~(3)がせん断ひずみ 10% 以下では適用範囲外であるため、どの復元力モデルについても最大変位が 10% 以下では弾性としている。また、修正 Ramberg-Osgood モデルにおいて式(9)、式(10)のパラメータ  $n$  はすべて  $n=2$  とした。

### 4.1 静的载荷実験

実験は、試験体に鉛直荷重を作用させた状態で水平方向にせん断変形を生じさせるような加力装置(図-9 参照)を用いて行なった。加力は変位制御とし、図-10 に示す変位プログラムに従った。同一変形における最後の値(3 ループ目)を実験値として採用した。実験によって得られた荷重-変形関係、および解析による荷重-変形関係を図-11(a)~(d)に示す。履歴ループの形状に関しては修正 Masing 則モデルが最も実験結果の傾向を良く表現している。実験結果との対応を定量的に把握するために、等価せん断弾性率  $G_0$  (図-12)、等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  (図-13)、Y 軸切片応力  $F_u$  (図-14) の 3 種類の指標を用いて比較を行なう。等価せん断弾性率、等価粘性減衰定数に関しては、本研究で用いた復元力モデルのすべてが実験式(1)、(2)を満足しているため、復元力モデルによる差異はない。したがって、ここでは実験値と既に

提案されている実験式(1)、(2)との比較になるが、小変形領域で等価粘性減衰定数に約 10% の差が見られる他は等価せん断弾性率、等価粘性減衰定数ともに良く一致している。Y 軸切片応力に関して、実験式(3)を満たしている復元力モデルは修正 Bi-Linear モデルのみである。小変形領域では修正 Bi-Linear モデルが、大変形領域では修正 Masing 則モデルが最も実験結果に近い。図-12、図-13 にはパラメータを固定として扱う通常非線形復元力モデル(図中では Normal Bi-Linear モデル、Normal Ramberg-Osgood モデルと呼称して修正モデルと区別している)についての結果も合わせて示している。パラメータはせん断ひずみ 50%、100% の各ひずみレベルにおいて修正 Bi-Linear モデル、修正 Ramberg-Osgood モデルと同様の方法を用いて 2 通り設定した。ここで設

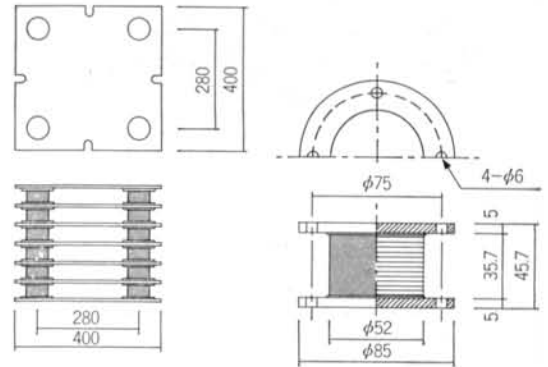


図-8 高減衰多段積層ゴム

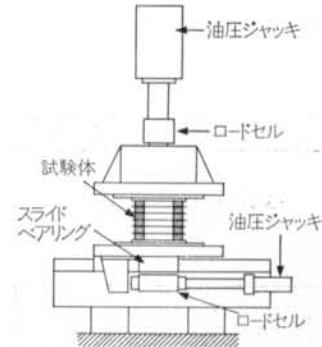


図-9 加力装置

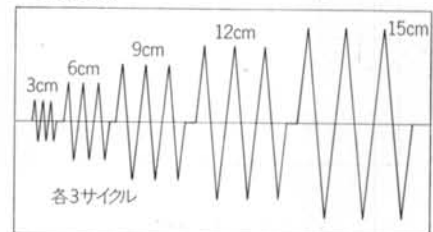
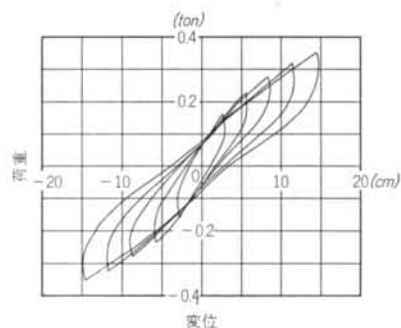
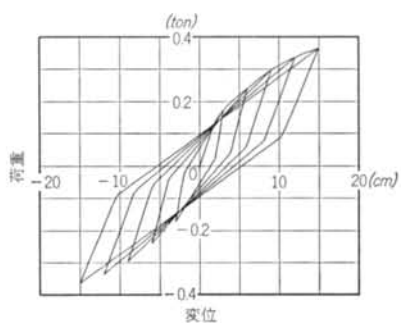


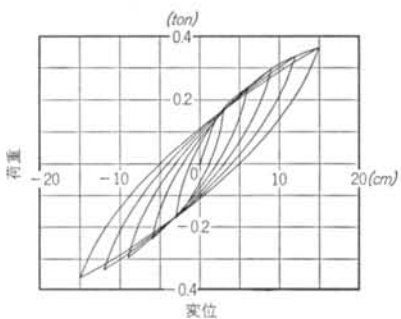
図-10 変位プログラム



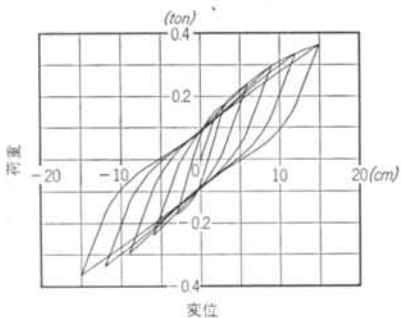
(a) 実験結果



(b) 修正 Bi-Linear モデル

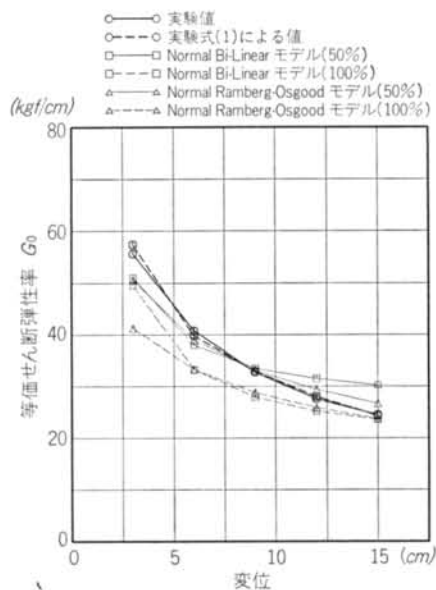


(c) 修正 Ramberg-Osgood モデル

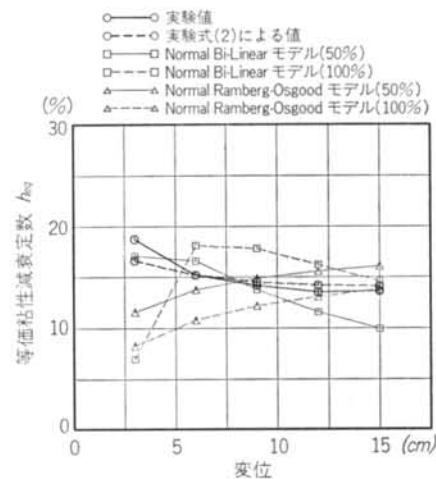


(d) 修正 Masing 則モデル

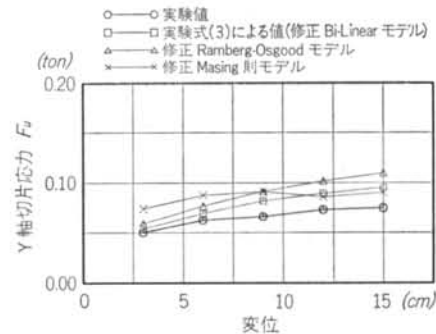
図—11 静的加力試験による荷重—変形関係



図—12 等価せん断弾性率の比較



図—13 等価粘性減衰定数の比較



図—14 Y軸切片応力の比較

定したパラメータの組み合わせを見る限り、どの組み合わせについても極く狭い領域においてしか実験式との対応が見られず、すべての領域において実験式と対応させることは困難である。これは、パラメータを固定させることの限界を示すものであり、ひずみ依存性の強い高減衰ゴムの復元力特性を表現するためには、変位に応じたパラメータ更新の手続きが不可欠であると考えられる。

#### 4.2 動的振動実験

振動実験に用いた試験体は図-15に示すように、静的載荷実験で用いた高減衰多段積層ゴム4台、鉄骨フレームおよびフリーアクセスフロアより構成される。計測は振動台、鉄骨フレーム、およびフリーアクセスフロア上に加速度計と変位計を設置して行なった。加振は図-16に示すように、この装置が5階建てあるいは10階建ての建物内に設置されることを想定して、建物の地震応答解

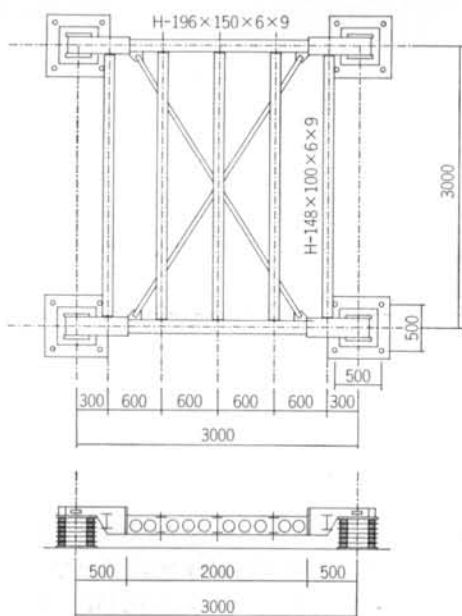


図-15 免震床システム

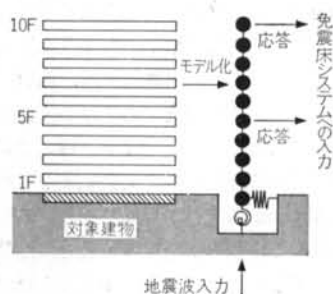


図-16 振動台入力波形の設定

析により得られた装置の設置階における応答加速度波形を振動台への入力波形とした。建物への入力地震波には El Centro 1940 NS 成分, Taft 1952 EW 成分, および Hachinohe 1968 NS 成分を用いた。表-1に加振ケースの一部を示す。実験結果の解析は、図-17に示すように試験体の1/4を1質点系振動モデルにモデル化して行なった。実験および解析によって得られた加速度、相対変位の最大値一覧を表-2に示す。ここで示した加振ケースでは、加振加速度に対して1/2~1/2.5の免震効果が得られていることが分かる。最大値に関する実験結果と解析結果との比較では各復元力モデルとも大きな差異はなく、実験結果と良い対応が見られる。次に、表-1の中から比較的応答変位の大きい Case 3 について、各復元力モデルを用いた解析による応答加速度波形を実験

| 加振ケース               | Case 1    | Case 2 | Case 3 | Case 4    |
|---------------------|-----------|--------|--------|-----------|
| 建物階数                | 5         | 10     | 10     | 5         |
| 免震床設置階              | 5         | 5      | 10     | 5         |
| 入力波                 | Hachinohe | Taft   | Taft   | El Centro |
| 建物入力最大加速度 (gal)     | 250       | 250    | 250    | 400       |
| 免震床設置階応答最大加速度 (gal) | 348       | 308    | 427    | 455       |

表-1 加振ケース

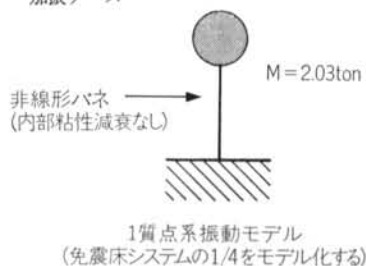


図-17 振動解析モデル

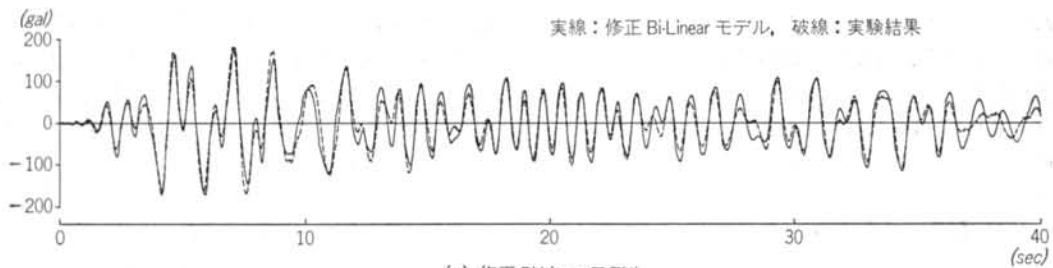
| 加振ケース            | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| 実験値              | 158    | 162    | 182    | 178    |
| 修正 Bi-Linear モデル | 144    | 155    | 180    | 175    |
| 修正 RO モデル        | 145    | 156    | 172    | 177    |
| 修正 Masing 則モデル   | 157    | 154    | 181    | 175    |

(a) 応答加速度 (gal)

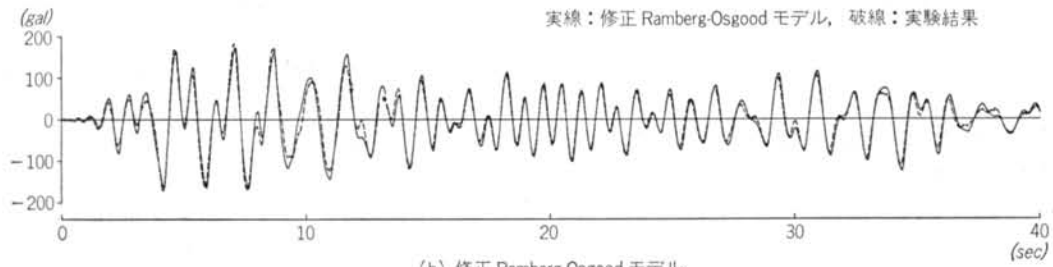
| 加振ケース            | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| 実験値              | 9.23   | 10.72  | 14.29  | 14.40  |
| 修正 Bi-Linear モデル | 9.15   | 10.75  | 15.99  | 14.77  |
| 修正 RO モデル        | 9.20   | 10.84  | 14.18  | 15.29  |
| 修正 Masing 則モデル   | 9.56   | 10.58  | 16.34  | 14.84  |

(b) 応答変位 (cm)

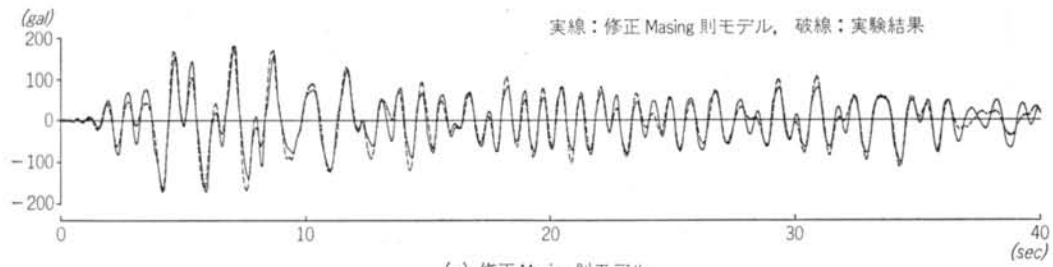
表-2 応答最大値



(a) 修正 Bi-Linear モデル



(b) 修正 Ramberg-Osgood モデル



(c) 修正 Masing 則モデル

図-18 加速度応答波形の比較

により得られた波形と重ねて図-18に示す。応答の最大値付近の領域では、各復元力モデルとも大きな差異はなく、最大値で比較する限りどの復元力モデルも実験値と良い対応を示す。これは骨格曲線に用いた実験式(1)がすべて同じであり、かつその実験式が高減衰ゴムの性状を適切に表現していることによるものと考えられる。ここでは、修正 Ramberg-Osgood モデルによる結果が他の復元力モデルと比較して実験結果と良く対応しており、この傾向は加速度波形における最大値以後の小振幅領域で顕著である。これは、修正 Masing 則モデルが実験式の適用範囲以下(せん断ひずみ10%以下)を線形としているため、また修正 Bi-Linear モデルでは初期剛性上では線形であるために、小振幅領域において履歴減衰が生じないのに対して、修正 Ramberg-Osgood モデルでは小振幅領域においても履歴減衰が生じることが原因と考えられる。修正 Masing 則モデルについては、小振幅領域における実験式の拡張により改善が可能と思われる。

## § 5. まとめ

高減衰積層ゴムの復元力特性を適切に表現できる復元力モデルを提案し、既往の復元力モデルを含めて、実験結果との比較において各モデルの妥当性を検討した。本研究において提案したモデルは、履歴則として多く用いられている Masing 則を適用し、その他の情報は高減衰積層ゴムの物性をできるだけ取り込むように設定したモデルである。本研究で用いた実験結果は、積層ゴムのせん断ひずみにして約 100% 程度であるため復元力モデルによる差は顕著には現われなかったが、総じて以下のような結論を見いだせる。静的載荷実験結果との比較においては、修正 Masing 則モデルが履歴ループの傾向を最も良く表現している。動的振動実験結果との比較では、応答の最大値に関してはどの復元力モデルもほぼ同様の結果であるが、波形の比較では最大値以後の小振幅領域



において修正 Ramberg-Osgood モデルが比較的良く対応していた。本研究では、Masing 則において骨格曲線に用いた実験式を履歴曲線にも適用するモデルを提案しており、この考え方は高減衰積層ゴムの復元力特性だけ

でなく、履歴減衰を有する他の材料の復元力特性にも適用できると考えている。

謝辞 実験にご協力頂いた株式会社ブリヂストンに深謝します。

#### <参考文献>

- 1) 日本建築学会編：“免震構造設計指針” 日本建築学会（1989年）
- 2) 日本建築センター免震構造安全評価指針部会編：“新建築構造技術研究報告書，No.2”（平成元年7月）
- 3) 日本建築センター免震装置部会編：“新建築構造技術研究報告書，No.3”（平成元年7月）
- 4) 門河直実，他：“免震構法の開発に関する研究（その1），（その2）” 東急建設技術研究所報 No.14（1988年）
- 5) ブリヂストン：“マルチラバーベアリング” 免震ゴムテクニカルデータファイル No.4
- 6) 藤田隆史，鈴木重信，藤田聡：“建物免震用の高減衰積層ゴムに関する研究（第1報，履歴復元力の基本特性と解析モデル）” 日本機械学会論文集（C編） 第56巻，523号（1990年3月）
- 7) 菊地優，田村和夫，前林和彦，金子美香：“高減衰積層ゴムの復元力特性に関する研究” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1990年10月）
- 8) P.C. Jennings: “Periodic Response of a General Yielding Structure” Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 90, No. 2 (April, 1964)
- 9) E. Rosenblueth and I. Herrera: “On a Kind of Hysteretic Damping” Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 90, No. 4 (Aug. 1964)
- 10) 須賀川勝，中村康一，前林和彦，渡辺弘之，水津洋二，正木信男：“高減衰多段積層ゴムを用いた免震床システムの開発” 日本建築学会大会学術講演梗概集（昭和63年10月）

